

Navigation system for a vehicle, especially a land craft

Patent Number: ☐ US6205401
Publication date: 2001-03-20
Inventor(s): WICK DETLEV (DE); PICKHARD FRIEDHELM (DE)
Applicant(s): LITEF GMBH (US)
Requested Patent: ☐ DE19536601
Application Number: US19980029165 19980319
Priority Number(s): DE19951036601 19950919; WO1996EP03907 19960905
IPC Classification: G06G7/78; G01S5/00
EC Classification: G01C21/16A, G01C21/28
Equivalents: ☐ EP0852000 (WO9711334), B1, ☐ WO9711334

Abstract

The invention relates to a navigation system for a vehicle, in particular for a land vehicle, having at least one single-axis gyro for the vehicle vertical axis (z axis), having two accelerometers in the horizontal vehicle plane (x axis, y axis), and having a vehicle-axis velocity measurement device, for example, a distance-travelled sensor. In addition, supporting signal devices, in particular a satellite receiver and/or a map, are available as well as a controller, which uses a suitable Kalman filter to determine the vehicle position and/or the direction of travel from the measured and stored signals. The Kalman filter is assigned at least one partial filter, of which a first partial filter is used for dynamic levelling and/or a second partial filter is designed as a position filter which provides track calibration, position calibration and sensor calibration

Data supplied from the esp@cenet database - I2



DEUTSCHES
PATENTAMT

② Aktenzeichen: 195 36 601.8
② Anmeldetag: 19. 9. 95
④ Offenlegungstag: 20. 3. 97

DE 195 36 601 A 1

⑦ Anmelder:
TELDIX GmbH, 69123 Heidelberg, DE

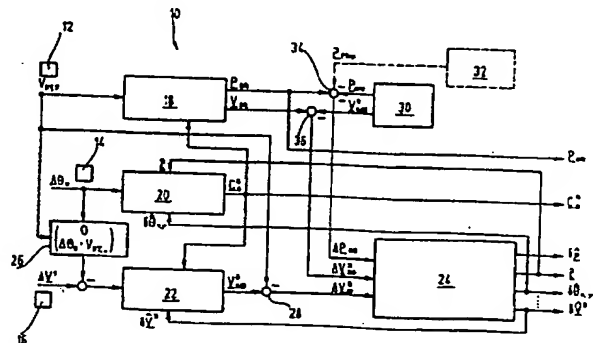
⑦ Vertreter:
Patentanwälte MÜLLER & HOFFMANN, 81667
München

⑦ Erfinder:
Pickhard, Friedhelm, Dipl.-Ing., 33142 Büren, DE;
Wick, Detlev, Dr.-Ing., 69190 Walldorf, DE

⑤ Navigationssystem für ein Fahrzeug, insbesondere für ein Landfahrzeug

⑤ Die Erfindung betrifft ein Navigationssystem für ein Fahrzeug, insbesondere für ein Landfahrzeug, mit wenigstens einem einachsigen Kreisel für die Fahrzeughochachse (z-Achse), mit zwei Beschleunigungsmessern in der horizontalen Fahrzeugebene (x-Achse, y-Achse), und einer fahrzeugfesten Geschwindigkeitsmessung, zum Beispiel einem Weggeber. Zusätzlich sind Stützsignaleinrichtungen, insbesondere ein Satellitenempfänger und/oder eine Karte, verfügbar sowie eine Steuerung, die aus den gemessenen und gespeicherten Signalen mit Hilfe eines geeigneten Kalman-Filters die Fahrzeugposition und/oder die Fahrtrichtung bestimmt.

Es ist vorgesehen, daß dem Kalman-Filter (24) wenigstens ein Teilfilter zugeordnet ist, von denen ein erster Teilfilter einer dynamischen Horizontierung dient und/oder ein zweiter Teilfilter als Positionsfilter ausgebildet ist, der eine Kurs-, Positions- und Sensorkalibration bewirkt.



DE 195 36 601 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft Navigationssysteme für ein Fahrzeug, insbesondere für ein Landfahrzeug, mit den im Oberbegriff des Anspruchs 1 genannten Merkmalen.

Stand der Technik

Es ist bekannt, Fahrzeuge mit Navigationssystemen auszustatten, die eine Bestimmung der Position und der Richtung des Fahrzeugs gestatten. Die Fahrzeuge weisen hierzu sogenannte Inertialsysteme auf, die mit fahrzeugfesten Sensoren ausgestattet sind. Als Sensoren werden üblicherweise den Achsen eines karthesischen Koordinatensystems zugeordnete Beschleunigungsmesser und Kreisel eingesetzt. Die Achsen des Koordinatensystems sind hierbei so gelegt, daß eine x- und eine y-Achse in der horizontalen Fahrzeugebene liegen und eine z-Achse mit der Fahrzeughochachse zusammenfällt. Typische Anwendungsfälle derartiger Inertialsysteme sind Koppelnavigationssysteme, Inertialnavigationssysteme und Kurs-/Lagereferenzsysteme. Bei einer allgemein angewandten Kurs-/Lagerechnung werden mittels der den einzelnen Achsen des Koordinatensystems zugeordneten Kreisel die Kurs-/Lageinformationen des Fahrzeugs, beispielsweise als Richtungskosinusmatrix, ermittelt. Durch Verknüpfung der Richtungskosinusmatrix mit einer gemessenen fahrzeugfesten Geschwindigkeit kann eine Koppelnavigation in bekannter Weise berechnet werden. Die fahrzeugfeste Geschwindigkeitsmessung dient hierbei auch als Stützmessung für die Lagebestimmung des Fahrzeugs. Die derart ermittelten Kurs und Position des Fahrzeugs werden mit Stützinformationen verknüpft, die nur eingeschränkt verfügbar sein können. Hierzu ist es bekannt, die Fahrzeuge mit Empfängern von Satellitennavigationssystemen — beispielsweise GPS — auszustatten, die Geschwindigkeits- und/oder Positionssignale zur Verfügung stellen. Alternativ können zur Stützung auch Positionskoordinaten aus Karten übernommen werden, wobei es für die vorliegende Anwendung unerheblich ist, ob diese Positionsinformationen aus einer digitalen Karte oder einer Papierkarte entnommen werden. Mittels dieser Stützinformationen können Positions- und Geschwindigkeitsmessungen mit den auf bordautonomen Messungen basierenden Signalen verglichen werden und als Differenzsignale einem Kalman-Filter als Beobachtung zugeführt werden, das ein linearisiertes Modell der Algorithmen für die Berechnung der Navigationsdaten des Navigationssystems beinhaltet. Mittels des Kalman-Filters werden Korrekturen für die Navigationsparameter und für die Kalibration der Sensoren des Navigationssystems geschätzt.

Hierbei ist nachteilig, daß durch die Nichtlinearität der Kurs-/Lagerechnung des Navigationssystems einerseits und der linearen Approximation in den Modellgleichungen des Kalman-Filters andererseits fehlerhafte Schätzungen entstehen können, wenn das Filter außerhalb des zulässigen linearen Arbeitsbereiches betrieben wird.

Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Navigationssystem mit den im Anspruch 1 genannten Merkmalen bietet demgegenüber den Vorteil, daß Fehler reduziert werden können, die ihre Ursache in dem nichtlinearen Charakter der Kurs-/Lagerechnung und der linearen Approximation des Fehlermodells im Kalman-Filter haben. Insbesondere bei Fahrzeugen mit einem eingeschränkten Lagewinkelbereich, beispielsweise bei Landfahrzeugen, sind Instrumentierungen des Navigationssystems möglich, die mit nur einem der Fahrzeughochachse zugeordneten Kreisel auskommen. Dadurch, daß dem Kalman-Filter wenigstens ein Teilfilter zugeordnet ist, von denen ein erster Teilfilter einer dynamischen Horizontierung dient und/oder ein zweiter Teilfilter als Positionsfilter ausgebildet ist, ist es vorteilhaft möglich, Filterverfahren durchzuführen, die Fehler reduzieren, die durch das Fehlen der horizontalen Fahrzeugebene zugeordneten Kreisel verursacht werden. Darüber hinaus ist eine Überwachung des Kalibrationszustandes, insbesondere der azimutalen Ausrichtung um eine durch nichtlineare Effekte verursachte Systemdekalibration, das heißt, eine Kurs-, Position- und Sensordekalibration möglich, wobei die Dekalibration erkannt und beseitigt werden kann. Sehr vorteilhaft kann hierbei weiterhin das lineare Fehlermodell als Basis des Kalman-Filters beibehalten werden, um den erhöhten numerischen und analytischen Aufwand für die Realisierung eines Kalman-Filters mit nichtlinearem Modell zu vermeiden.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den übrigen in den Unteransprüchen genannten Merkmalen.

Zeichnungen

Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine Signalverarbeitungsstruktur eines Navigationssystems mit erfindungsgemäß reduzierter Sensor-konfiguration;

Fig. 2 einen möglichen Zustand des Fahrzeuges;

Fig. 3 eine Signalverarbeitungsstruktur des Navigationssystems nach einem weiteren Ausführungsbeispiel;

Fig. 4 eine Fehlerschätzgleichung eines Positionsfilters;

Fig. 5 ein Gesamtfehlermodell einer Horizontalnavigation;

Fig. 6 eine Signalverarbeitungsstruktur des Navigationssystems nach einem weiteren Ausführungsbeispiel;

Fig. 7 eine Fehlerschätzgleichung eines Positionsfilters gemäß Fig. 6.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Fig. 1 zeigt eine Signalverarbeitungsstruktur eines allgemein mit 10 bezeichneten Navigationssystems eines

nicht dargestellten Fahrzeugs. Bei den Ausführungsbeispielen wird davon ausgegangen, daß es sich um ein Landfahrzeug, beispielsweise ein Kraftfahrzeug handelt. Das Navigationssystem 10 besitzt in der Darstellung links dargestellte b rdaunome fahrzeugfeste Meßeinrichtungen und in der Darstellung rechts dargestellte Meßeinrichtungen, die zeitlich eingeschränkt Meßsignale zur Verfügung stellen können. Als fahrzeugfeste Meßeinrichtungen ist ein Weggeber 12, ein einer Fahrzeughochachse, hier als z-Achse definiert, zugeordneter einachsiger Kreisel 14 und der horizontalen Fahrzeugebene jeweils in der x-Achse und y-Achse zugeordnete Beschleunigungsmesser 16 vorgesehen. Der Weggeber 12, der Kreisel 14 beziehungsweise die Beschleunigungsmesser 16 liefern von dem jeweiligen Fahrzeugzustand abhängige Signale, die in noch zu erläuternder Weise einer Koppelnavigation 18, einer Kurs-/Lagerechnung 20 und einer Geschwindigkeitsberechnung 22 zugeführt werden. Die Kurs-/Lagerechnung 20 liefert anhand der von dem z-Kreisel 14 gelieferten Signale eine Richtungskosinusmatrix C_B^R , wobei durch das Fehlen der x-Kreisel beziehungsweise y-Kreisel die diesen Achsen zuzuordnenden Drehraten von einem Kalman-Filter 24 in noch zu erläuternder Weise als Schätzwerte geliefert werden.

Die Beschleunigungsmesser 16 liefern die in der x-Richtung beziehungsweise y-Richtung auftretenden Beschleunigungssignale an die Geschwindigkeitsberechnung 22. Die Beschleunigungssignale werden zuvor über eine Coriolis-Korrektur 26 (in fahrzeugfesten Koordinaten) abgeglichen, um aufgrund einer von genau mit der x-Achse, y-Achse beziehungsweise z-Achse abweichenden Bewegungs- und damit Beschleunigungsrichtung ausgehende Coriolis-Beschleunigungen berücksichtigen zu können. Bei dem Ausführungsbeispiel wird davon ausgegangen, daß aufgrund der Erddrehung induzierte Coriolis-Beschleunigungen vernachlässigbar sind. Die Coriolis-Korrektur 26 verarbeitet hierbei die von dem Weggeber 12 beziehungsweise dem z-Kreisel 14 zur Verfügung gestellten Signale. Da durch das Nichtvorhandensein der x-Kreisel und y-Kreisel von diesen keine Signale bereitgestellt werden können, erfolgt die Berechnung der Coriolis-Korrektur des Fahrzeugs entsprechend der nachfolgend aufgeführten Matrix:

$$\Delta \underline{\theta}^B \times \underline{v}^B = \begin{pmatrix} -\Delta \theta_z \dot{y}_x^0 + \Delta \theta_y \dot{y}_z^0 \\ \Delta \theta_z \dot{v}_x - \Delta \theta_y \dot{y}_z^0 \\ -\Delta \theta_x \dot{v}_y + \Delta \theta_y \dot{v}_x \end{pmatrix}$$

Durch das Nichtvorhandensein der x-Kreisel und y-Kreisel vereinfacht sich die Matrix zur Berechnung der Coriolis-Korrektur für die fahrzeugfeste x- und y-Achse in folgender Weise:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta \theta_z \cdot \dot{v}_{D,x} \end{pmatrix}$$

Die Geschwindigkeitsberechnung 22 berechnet aus den derartig korrigierten Beschleunigungsmessersignalen die inertielle Geschwindigkeit V_{INS} des Fahrzeugs. Diese inertielle Geschwindigkeit wird einem Differenzglied 28 zugeführt, dem gleichzeitig die vom Weggeber 12 gelieferte Weggebergeschwindigkeit zugeführt wird, und als Differenz zu der Weggebergeschwindigkeit dem Kalman-Filter 24 als Beobachtung zugeführt. Diese Beobachtung dient als Lagestützung der Navigationsberechnung.

Anstelle der hier erläuterten fahrzeugfesten Berechnung der inertialen Geschwindigkeit beziehungsweise der hieraus resultierenden Beobachtung kann gemäß einem nicht dargestellten Ausführungsbeispiel auch eine erdfeste Lagestützungsinformation ermittelt und bereitgestellt werden. Hierbei ist jedoch der Berechnungsaufwand durch den Abgleich mit erdfesten Koordinatenpunkten aufwendiger. Der Geschwindigkeitsberechnung 22 wird ferner die Richtungskosinusmatrix C_B^R und ein vom Kalman-Filter 24 gelieferter Schätzwert der Geschwindigkeit zugeführt.

Der Kalman-Filter 24 hat bei der gezeigten Konfiguration der fahrzeugfesten Meßeinrichtungen unter anderem die Aufgabe, Schätzwerte der fehlenden Drehratenmessungen in der fahrzeugfesten Horizontalebene, das heißt in der x-Richtung und y-Richtung, zu liefern und diese quasikontinuierlich auf die Kurs-/Lagerechnung 20 und die Geschwindigkeitsberechnung 22 mit geeigneter Bandbreite zurückzuführen. Die quasikontinuierliche Rückführung der Schätzwerte in den Berechnungsablauf des Navigationsalgorithmus stellt sicher, daß eine Verknüpfung mit der Dynamik der Schätzwerte der horizontalen Drehrate gewährleistet ist. Anstelle der quasikontinuierlichen Bereitstellung der dynamischen Schätzwerte der Drehraten kann ebenfalls ein hierzu äquivalenter Schätzwert, beispielsweise die Winkelinkremente der horizontalen Fahrzeugachsen erfolgen.

Der Koppelnavigation 18 werden die vom Weggeber 12 gelieferten Signale sowie die Richtungskosinusmatrix der Kurs-/Lagerechnung 20 zugeführt. Aus diesen zur Verfügung stehenden Signalen berechnet die Koppelnavigation 18 ein Positionssignal P und ein Geschwindigkeitssignal V. Das von der Koppelnavigation 18 gelieferte Positionssignal P und die von der Kurs-/Lagerechnung 20 gelieferte Richtungskosinusmatrix C_B^R liefern die unkorrigierten Navigationsdaten, das heißt die Position, den Kurs und die Lage des Fahrzeugs, des gesamten Navigationssystems 10.

Zur Stützung von Kurs und Position werden Stützinformationen zum Beispiel über einen GPS-Empfänger 30 und/oder abgespeicherten Kartenpositionen 32 bereitgestellt. Der GPS-Empfänger 30 ist Bestandteil eines globalen Satellitennavigationssystems, mittels dem Positionssignale und Geschwindigkeitssignale bereitgestellt werden können. Mittels der Karte 32 läßt sich ebenfalls ein Positionssignal bestimmen. Verfahrensbedingt steht

die Stützinformation nur zeitlich eingeschränkt zur Verfügung, da der GPS-Empfang gestört sein kann, beispielsweise durch Abschattung, oder Kartenpunkte als Stützung nur dann verwendbar sind, wenn diese im Gelände identifizierbar sind.

Die von dem GPS-Empfänger 30 beziehungsweise der Karte 32 gelieferten Positions- und Geschwindigkeitssignale werden über Differenzglieder 34 beziehungsweise 36 mit dem von der Koppelnavigation 18 gelieferten fahrzeugfesten Positions- und Geschwindigkeitssignalen verglichen und deren Differenz als Beobachtung dem Kalman-Filter 24 zugeführt.

Der Kalman-Filter 24 basiert auf einem linearisierten Modell der Algorithmen des Navigationssystems 10 und hat die Aufgabe, Korrekturen für die Ausgabegrößen des Navigationssystems 10 und für die Kalibration der Meßeinrichtungen des Navigationssystems 10 zu schätzen.

Für die Schätzung der fehlenden Drehratenmessungen in der fahrzeugfesten Horizontalebene ist eine Anpassung des Kalman-Filters 24, das heißt eine Festlegung beziehungsweise Ordnung der hierfür notwendigen Fehlerzustände möglich. Für eine bevorzugte Anwendung wird das Kalman-Filter 24 hierzu derart modifiziert, daß die Fehlerzustände Lagefehler (Richtungskosinusmatrix-Parameter), Winkelinkrementfehler und Geschwindigkeitsfehler, die jeweils der in der fahrzeugfesten horizontalen Fahrzeugebene liegenden x-Achse beziehungsweise y-Achse ihren Ursprung haben. Diese sechs Fehlerzustände bilden einen Teilfilter des Kalman-Filters 24, das die dynamische Horizontierung als Basis für die Schätzung der horizontalen Drehraten in der x-Achse beziehungsweise y-Achse realisiert. Die Fehlerzustände sind hierbei zwei Lageparameterfehler σc_{31} , σc_{32} , zwei Winkelinkrementalfehler $\sigma \theta_x$ und $\sigma \theta_y$ und zwei Geschwindigkeitsfehler σv_x und σv_y definiert. Die Lageparameterfehler sind als additive Fehler zu den zugehörigen Richtungskosinusmatrixelementen $c_{31} = -\sin \theta$, $c_{32} = \sin \varphi \cos \theta$, definiert mit φ und θ als Roll- und Nickwinkel.

Nachfolgend ist ein diskretes Fehlermodell des Teilfilters des Kalman-Filters 24 für die dynamische Horizontierung als Fehlermodell 6. Ordnung in zeitdiskreter Formulierung dargestellt.

$$\begin{bmatrix} \delta c_{31} \\ \delta \theta_y \\ \delta v_x \\ \delta c_{32} \\ \delta \theta_x \\ \delta v_y \end{bmatrix}_K = \begin{bmatrix} 1 & -c_{33} & 0 & \Delta \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g\Delta T & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta \theta_z & 0 & 0 & 1 & c_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g\Delta T & 0 & 1 \end{bmatrix}_{K-1} \cdot \begin{bmatrix} \delta c_{31} \\ \delta \theta_y \\ \delta v_x \\ \delta c_{32} \\ \delta \theta_x \\ \delta v_y \end{bmatrix}_{K-1} + \underline{w}_{K-1}$$

$$\underline{\delta x}_K = \underline{\phi}_{K-1} \cdot \underline{\delta x}_{K-1} + \underline{w}_{K-1}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \end{bmatrix}_K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{\delta x}_K + \underline{v}_K$$

Als Beobachtung $\Delta \underline{v}_{xy}$ ist — wie bereits erwähnt — die Differenz aus fahrzeugfester Inertialgeschwindigkeit (von der Geschwindigkeitsberechnung 22) und Weggebergeschwindigkeit (vom Weggeber 12) definiert:

$$\Delta \underline{v}_{ID}^B \approx \underline{v}_{INS}^B - \underline{v}_{DT}^B = (\Delta v_x \Delta v_y)^T$$

Für die Dimensionierung und die Integration des Teilfilters für die dynamische Horizontierung innerhalb des Kalman-Filters 24 gilt, daß im stochastischen Modell insbesondere solche Meßstörungen sorgfältig zu modulieren sind, die in bezug auf die Lageinformation im Beschleunigungssignal als dynamische Störungen zu interpretieren sind, wobei die Verfügbarkeit der Weggebergeschwindigkeit als Informationsträger für die translatorische Bewegung zu berücksichtigen ist.

Die Filterschätzwerte des Teilfilters für die dynamische Horizontierung werden quasikontinuierlich in die Kurs-/Lagerechnung 20 des Navigationssystems 10 zurückgeführt. Im gezeigten Beispiel werden die Fehler-schätzwerte als Winkelinkrementkorrektur $\Delta \theta_{xy}$ als Drehratenschätzungen für die in der Instrumentierung fehlenden x-Kreisel und y-Kreisel bereitgestellt. Für die Aufschaltung der Korrekturen auf die Kurs-/Lagerechnung 20 sind jedoch auch andere algorithmische Realisierungen denkbar. Nachfolgend ist die Korrekturgleichung als Winkelinkrementschätzung für die Prozeßrückführung gezeigt, die auf den Schätzwerten des Teilfilters dynamische Horizontierung des Kalman-Filters 24 basiert.

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \end{pmatrix}_K = f \left[\begin{pmatrix} \delta c_{31} \\ \delta c_{32} \end{pmatrix}_K; \begin{pmatrix} \delta \theta_x \\ \delta \theta_y \end{pmatrix}_K; \Delta \theta_{z,K}; \underline{c}_{B,K-1}^R \right]$$

5

Nachfolgend wird die Notwendigkeit der Drehratenschätzung in der fahrzeugfesten Horizontalenebene und die Wirkungsweise in Verbindung mit der nichtlinearen Kurs-/Lagerechnung 20 an einem speziellen Fahrzeugmanöver näher erläutert. Hierzu ist in der Fig. 2 ein Fahrzeug 38 schematisch angedeutet, welches sich in einer Steilkurvenfahrt befindet. Mit x^B , y^B und z^B sind hierbei die fahrzeugfesten x-, y- beziehungsweise z-Achsen bezeichnet. Der Rollwinkel φ zwischen der Horizontalen und der y-Achse ist als konstant angenommen. Der Nickwinkel θ in der x-Achse ist gleich Null, während die Winkelgeschwindigkeit ψ in der z-Achse des Fahrzeugs 38 ebenfalls als konstant angenommen wird. Bei diesem in Fig. 2 dargestellten Manöver treten somit in der fahrzeugfesten y- und z-Achse stationäre Drehraten $\omega_{y,z}$ auf, wobei sich der Gesamtdrehratenvektor ω wie folgt darstellen läßt:

$$\underline{\omega}^B = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\psi} \sin \varphi \\ \dot{\psi} \cos \varphi \end{pmatrix}$$

20

Für die Navigation eines Fahrzeugs ist die Größe eines Azimutfehlers bedeutsam. Nachfolgend werden Azimutfehlergleichungen für unterschiedliche Ausstattungen des Fahrzeugs 38 mit Meßeinrichtungen, insbesondere Drehratenmeßeinrichtungen, dargestellt. Für den Fall, daß eine Drehratenmessung in der horizontalen y-Achse des Fahrzeugs 38 vorgesehen ist, ergibt sich folgende Fehlermodellgleichung:

25

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx -\varphi \cdot \frac{b_y}{g} + \varphi^2 \delta SF_{G,y} + \delta SF_{G,x}$$

30

35

wobei das weiter unten angegebene typische Fehlerbudget

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx 1.400 \text{ ppm}$$

40

beträgt.

Für einen zweiten Fall wird angenommen, daß keine Drehratenmessung in der y-Achse und ebenfalls keine Drehratenschätzung in der y-Achse erfolgt. Hier ergibt sich folgende Fehlermodellgleichung:

45

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx -\varphi^2 + \delta SF_{G,z}$$

50

wobei das typische Fehlerbudget

55

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx 10.000 \text{ ppm}$$

60

beträgt.

In einem dritten Fall, und hierauf bezieht sich die Erfindung, erfolgt keine Drehratenmessung in der fahrzeugfesten y-Richtung, sondern eine Drehratenschätzung in der y-Achse, ergibt sich folgende Fehlermodellgleichung:

65

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx -2\varphi \cdot \frac{b_y}{g} + \delta SF_{G_x}$$

5

wobei das typische Fehlerbudget

$$\frac{\Delta \dot{\psi}}{\omega_z} \approx 2.200 \text{ ppm}$$

15 beträgt.

Für das typische Fehlerbudget sind als Einzelfehler angenommen: δSF_{yz} ist der Skalenfaktorfehler des y-z-Kreisels [1000 ppm], b_y der Bias des y-Beschleunigungsmessers [10 mg] und φ der Rollwinkel [0,1 rad] bezeichnet.

Ein Vergleich der Fehlermodellgleichungen zeigt, daß bei einer einachsigen Kreiselinstrumentierung mit Drehratenschätzung sich der vom Beschleunigungsmesser-Bias abhängige Fehler im Vergleich zur dreiachsigen Drehratenmessung zwar verdoppelt, aber der vom Quadrat des Rollwinkels abhängige dominante Fehler für den Fall der einachsigen Drehratenmessung ohne Drehratenschätzung verschwindet. Die erfindungsgemäße Verwendung der Drehratenschätzung bewirkt für das Zahlenbeispiel eines typischen Fehlerbudgets, entsprechend der genannten Werte, einen um etwa den Faktor 5 reduzierten Azimutfehler für eine einachsige Drehratenmessung, während der Azimutfehler für die in Fig. 2 gezeigte Steilkurvenfahrt gegenüber einer dreiachsigen Drehratenmessung nur leicht zunimmt.

Das vorstehend erwähnte Steilkurvenmanöver ist lediglich beispielhaft. So sind bei typischen Fahrten des Fahrzeugs 38 durch Geländekonturen mit sich gleichzeitig ändernden Nick- und Rollwinkeln ebenfalls Manöver gegeben, für die die nichtlineare Charakteristik der Kurs-/Lagerechnung 20 von Bedeutung ist. Auch bei diesen Manövern bietet die Verwendung des erfindungsgemäßen dynamischen Horizontierungsfilters als Teilfilter des Kalman-Filters 24 mit Drehratenschätzung vergleichbare Verbesserungen in der Fehlerschätzung. Insgesamt läßt sich somit durch die Rückführung der Fehlerschätzung in die Kurs-/Lagerechnung 20 erreichen, daß trotz einer eingeschränkten Instrumentierung des Fahrzeugs, beispielsweise mit der Ausstattung lediglich eines z-Kreisels, und von Beschleunigungsmessern in den Fahrzeughorizontalachsen, die insbesondere durch den nichtlinearen Charakter der Kurs-/Lagerechnung 20 verursachten Fehlern vermieden beziehungsweise reduziert werden können. Der Einsatz des dynamischen Horizontierungsfilters erlaubt eine Schätzung der Drehratenkomponenten in der fahrzeugfesten Horizontalebene in einer für die jeweilige Anwendung angepaßten Bandbreite.

Im Beispiel wird von einer dynamischen Horizontierung durch einen Teilfilter des Kalman-Filters 24 ausgegangen, das auf dem diskreten Fehlermodell 6. Ordnung basiert. Variationen dieses Fehlermodells in bezug auf modifizierte Diskretierungsapproximationen sind möglich. Die Berechnung der Schätzwerte für die diskreten Winkelinkremente in der fahrzeugfesten x- und y-Achse kann in Verbindung mit der Kreismessung in z-Richtung als Eingangssignal für die Kurs-/Lagerechnung 20 verwendet werden. Alternative Formen der Verarbeitung der Schätzwerte des Kalman-Filters 24, das heißt des Teilfilters der dynamischen Horizontierung, in der Kurs-/Lagerechnung 20 sind möglich. Weiterhin kann die Dimensionierung des stochastischen Modells für das Kalman-Filter 24 adaptiv gestaltet werden. Eine bevorzugte Anwendung ist eine frequenzband-selektive Bewertung der translatorischen Störungen in den Beschleunigungsmessungen.

Darüber hinaus ist eine alternative Definition des Fehlerzustandes für das erläuterte Fehlermodell möglich. Hier kann beispielsweise eine Ordnungsreduktion auf einen Teilfilter vierter Ordnung durch Vernachlässigung der Fehlerzustände der Winkelinkrementfehler oder auch eine Transformation der Lagefehler, Drehratenfehler und Geschwindigkeitsfehler in andere Darstellungsformen erfolgen.

Der Teilfilter der dynamischen Horizontierung kann auch in dem gesamten Kalman-Filter 24 eingebunden bleiben, so daß der Kalman-Filter 24 insgesamt seine Funktion für das Navigationssystem 10 beibehalten kann. Darüber hinaus ist es möglich, den Teilfilter der dynamischen Horizontierung in zwei Teilfilter, bezogen auf zwei orthogonale Achsen, aufzuteilen. Hierbei können für die Filterdimensionierung die Kopplungen zwischen den beiden Teilfiltern vernachlässigt werden, wobei aber bei der Realisierung der Schätzfehlergleichungen diese Kopplungen als deterministische Eingangssignale berücksichtigt werden müssen. Für das erläuterte Fehlermodell hat die Vernachlässigung der Kopplungen zur Folge, daß zwei Teilfilter dritter Ordnung, beispielsweise als Nickwinkel- und Rollwinkelfilter, als stationäre Kalman-Filter ausgelegt werden können, da die zugehörigen Fehlermodelle dritter Ordnung nahezu zeitinvariant sind. Für die Realisierung der Schätzgleichungen ist aber die Berücksichtigung der $\delta\Theta_z$ -Kopplungen wesentlich.

Im weiteren soll auf ein zweites Teilfilter des Kalman-Filters 24 eingegangen werden, das zur Positions- und Azimutkorrektur sowie zur Sensorkalibration dient. Das zweite Teilfilter bezieht sich auf die Fehlerzustände der Positionsfehler, der Azimutfehler, der z-Kreiselfehler (Drift, Skalenfaktorfehler) und des Skalenfaktorfehlers des Weggebers. Das zweite Teilfilter stellt somit einen Filter 6. Ordnung dar und bewirkt eine Kurs-, Positionskorrektur- und Sensorkalibrierung. Dieser zweite, nachfolgend als Positionsfiler bezeichnete Teilfilter des Kalman-Filters 24 kann außerhalb des zulässigen Arbeitsbereiches seines linearen Modells bei einer Erstinbetriebnahme oder einem Fahrzeugtransport mit ausgeschaltetem Navigationssystem 10 bedeutsam sein. Durch eine Überwa-

chung des linearen Arbeitsbereiches des Positionsfilters ist eine automatische Initialisierung des Positionsfilters mit den zugehörigen Fehlerzuständen, für die eine Initialisierung notwendig ist, möglich. Hierbei sind die Betriebszustände des Positionsfilters, nämlich die Betriebszustände Fahrt des Fahrzeugs und Stillstand des Fahrzeugs zu unterscheiden. Eine Erkennung des Fahrzeugzustandes kann durch einen Überwachungsalgorithmus der einzelnen Meßeinrichtungen des Navigationssystems 10 erfolgen. Auf die Erkennung des Fahrzeugzustandes soll im Rahmen der vorliegenden Beschreibung jedoch nicht näher eingegangen werden. 5

Die erfindungsgemäße Fehleranalyse basiert auf einer transformierten Form des Fehlermodells des Positionsfilters, also des zweiten Teilfilters des Kalman-Filters 24, mit folgenden modifizierten Fehlerzuständen:

Die Positionfehler werden von einer erdfesten Darstellung δp und $\delta \lambda$ in eine auf die Horizontalebene projizierte fahrzeugfeste Darstellung δp_{xy} transformiert. 10

In der Fig. 3 ist das Navigationssystem 10 in einer weiteren Ausführungsvariante gezeigt, wobei gleiche Teile wie in Fig. 1 mit gleichen Bezugszeichen versehen und nicht nochmals erläutert sind. Zu der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsvariante ist zusätzlich ein Transformationsglied 40 vorgesehen, das die dem Kalman-Filter 24 zugeführten Beobachtungen der Position Δp und der Geschwindigkeit Δv über eine Matrix in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem transformiert, so daß die innerhalb des Positionsfilters bereits in die fahrzeugfeste Form 15 transformierten Fehlerzustände auf ebenfalls in die fahrzeugfeste Form transformierte Beobachtungen zurückgreifen können. Hierdurch wird eine weitere Vereinfachung des Fehlermodells möglich.

Denn dadurch wird eine Aufteilung des Fehlerzustandes des Positionsfilters in seinen Along-Track-Fehler, dem Along-Track-Positionsfehler und dem Weggeberskalenfaktorfehler δSF_{PT} , und seinem Cross-Track-Fehler, dem Cross-Track-Positionsfehler δp_y , dem Azimutfehler $\delta \psi$ und den z-Kreiselfehler, dem Driftfehler δz und 20 dem Skalenfaktorfehler δSF_{Gz} ermöglicht.

In der Fig. 4 ist die Fehlerschätzgleichung des Positionsfilters in kontinuierlicher Form, dargestellt, und zwar in der Form mit einem in eine fahrzeugfeste Darstellung transformierten Fehlerzustand. Da der Fehlerzustand des Skalenfaktorfehlers des z-Kreisels für die folgende Fehleranalyse vernachlässigbar ist, wurde dieser aus Gründen der vereinfachten Darstellung nicht weiter berücksichtigt. 25

In der Fig. 5 ist ein Gesamtfehlermodell für eine Horizontalnavigation einer gestützten Koppelnavigation dargestellt. Das Fehlermodell gemäß der Fig. 5 umfaßt somit die nichtlinearen Navigationsalgorithmen in Verbindung mit dem auf einem linearen Modell basierenden Positionsfiler als Teilfilter des Kalman-Filters 24 und der Rückführung der Filterschätzwerte als Korrektur in die Navigationsalgorithmen. 30

Nachfolgend soll auf die Unterschiede der in den Fig. 4 und 5 dargestellten Fehlermodelle eingegangen werden. 30

Bei dem in Fig. 4 gezeigten Fehlermodell sind die Fehlerschätzwerte dargestellt, während die in Fig. 5 dargestellten Fehlerzustände den Gesamtfehler der berechneten Navigationsgrößen gegenüber den tatsächlichen Navigationsgrößen beschreibt. Das Fehlermodell gemäß Fig. 5 enthält nichtlineare Blöcke des Azimutfehlers $\delta \psi$ mit der Eigenschaft, daß für kleine Azimutfehler $\delta \psi$ die Fehlerschätzgleichung gemäß Fig. 5 sich an die Struktur der Fehlerschätzgleichung gemäß Fig. 4 angleicht. 35

Die Analyse des Gesamtfehlermodells gemäß der Fig. 5 zeigt dann Fehlfunktionen des Navigationssystems 10 auf, wenn der Azimutfehler $\delta \psi$ große Werte annimmt. Einerseits kann bei großen Werten für den Azimutfehler $\delta \psi$ größer 90° das Fehlermodell instabil werden, während andererseits über die zusätzliche Kopplung zum Along-Track-Teilfilter des Positionsfilters für große Azimutfehler $\delta \psi$ der Weggeberskalenfaktor dekalibriert werden kann. Die Ursachen für einen Azimutfehler $\delta \psi$ können in einem großen Ausgangsfehler $\delta \psi(0)$ liegen oder auch durch eine Stützung mit einem sehr großen Positionsfehler verursacht werden. Beide Fehlerursachen treten beispielsweise durch fehlerhafte Eingaben oder nach einem Transport des Fahrzeugs bei abgeschaltetem Navigationssystem 10 mit einer eventuellen automatischen GPS-Stützung nach dem Wiedereinschalten auf, da für normale Betriebszustände immer das Navigationsergebnis vor dem letzten Abschalten gespeichert wird. 40

Um die Dekalibration des Positionsfilters und damit des gesamten Navigationssystems 10 zu vermeiden, wird der Positionsfiler während des durch eine Fahrt charakterisierten Betriebszustandes des Fahrzeugs in seinem linearen Arbeitsbereich überwacht. Hierbei wird jede dem Positionsfiler zugeführte Stützposition, wie die Fig. 4 und 5 zeigen, auf Plausibilität geprüft. Nur bei Erfüllung der Plausibilitätsbedingungen wird die Positionsstützung durchgeführt. Werden die Plausibilitätsbedingungen nicht erfüllt, wird das Navigationssystem 10 mit der Stützposition initialisiert und das Positionsfiler in einen definierten Status (Default-Status) versetzt. 50

Nach Einschalten des Navigationssystems 10 wird die erste Positionsstützung zur Initialisierung verwendet und das Positionsfiler in den Default-Status versetzt. Der Azimut wird hierbei grundsätzlich, außer bei einer Azimuteingabe oder einer Korrektur durch eine Azimutüberwachung, beibehalten.

Die Azimutüberwachung kann derart erfolgen, daß neben der gestützten Navigationsrechnung eine ungestützte Kontrollnavigation berechnet wird, die an jedem Kontrollpunkt mit der gestützten Navigation abgeglichen wird. Die ungestützte Kontrollnavigation wird mit einem unabhängig bestimmten Grobазимут verglichen. Dieser Grobазимут kann beispielsweise über eine Triangulation mit zwei Referenzpunkten, die beispielsweise über den GPS-Empfänger 30 und/oder Kartenpunkte 32 bereitgestellt werden, bestimmt werden oder direkt als GPS-Azimut ausgelesen werden beziehungsweise aus der GPS-Geschwindigkeit bestimmt werden. 60

Wenn die ermittelte Azimutabweichung hinreichend klein ist, kann die Navigationsrechnung fortgesetzt werden. Andernfalls wird die Navigation mit der Referenzposition dem Grobазимут initialisiert und das Positionsfiler in den definierten Default-Status versetzt. Die Kontrollnavigation wird nach Abgleich mit der gestützten Navigation nach jedem Kontrollpunkt neu gestartet. Der erwähnte Default-Status des Positionsfilters bewirkt, daß alle Sensorkalibrationswerte auf bestimmte gespeicherte, zuvor auf ihre Richtigkeit überprüfte Werte zurückgesetzt werden. Dies können sehr vorteilhaft Sensorkalibrationswerte sein, die bei der letzten durchgeführten Kontrollnavigation ermittelt wurden, die zu keiner Rücksetzung des Positionsfilters auf den Default-Status geführt haben. Um eine ausreichende Lernfähigkeit des Positionsfilters zu erreichen, wird die 65

Kovarianzmatrix des Positionsfilters diagonalisiert und in der Hauptdiagonalen mit geeigneten Default-Werten besetzt.

Sehr vorteilhaft können für die Plausibilitätsprüfung der Stützsituationen und der Azimut-Überwachung statistische Fehlerbewertungsverfahren verwendet werden, die als Selbstdiagnose die im Kalman-Filter 24 berechnete Kovarianzinformationen zu den Filterschätzgrößen benutzen.

Wurde bisher bei der Überwachung des linearen Arbeitsbereiches des Positionsfilters von einem durch Fahrt gekennzeichneten Betriebszustand des Fahrzeugs ausgegangen, läßt sich das Positionsfiler auch so modifizieren, daß sich die Überwachung des linearen Arbeitsbereiches auch bei einem durch einen Stillstand gekennzeichneten Betriebszustand des Fahrzeugs errichten läßt. Der durch den Stillstand gekennzeichnete Bewegungszustand des Fahrzeugs kann mittels eines Algorithmus identifiziert und überwacht werden, der durch eine Auswertung der Sensoren des Navigationssystems ausgelöst wird. Bei Erkennen des Stillstand-Zustands ergibt sich, daß die Position konstant ist, die Geschwindigkeit gleich Null ist und der Azimut ebenfalls konstant ist.

In der Fig. 6 wird eine modifizierte Signalverarbeitungsstruktur der gestützten Koppelnavigation gezeigt, die an den durch einen Stillstand des Fahrzeugs gekennzeichneten Zustand angepaßt ist. Gleiche Teile wie in den vorhergehenden Figuren sind wiederum mit gleichen Bezugszeichen versehen und nicht nochmals erläutert.

Durch die erfolgte Definition des Stillstandszustandes ist der Koppelkurs konstant. Die von dem z-Kreis 14 bereitgestellten Meßsignale werden als Fehlersignal interpretiert aus diesem Grunde nicht mehr der Kurs-/Lagerechnung 20, sondern nur noch direkt als Beobachtung dem Kalman-Filter 24 zugeführt. Darüber hinaus ist durch den Stillstand des Fahrzeugs die von dem GPS-Empfänger 30 an sich bereitgestellte Geschwindigkeitsmessung nicht mehr verfügbar. Für Gerätekonfigurationen, die (optional) einen nordsuchenden Kreis 14 als zusätzliche Baugruppe enthalten, kann im Stillstand der von der Koppelnavigation 18 bereitgestellte Azimut mit dem des nordsuchenden Kreises 42 verglichen werden, so daß eine Azimut-Korrektur aus dem Koppelkurs und dem gelieferten Meßwert des nordsuchenden Kreises 42 ermittelt und als Beobachtung auf das Kalman-Filter 24 aufgeschaltet werden kann.

Anhand der Fig. 7 wird die Auswirkung des durch den Stillstand gekennzeichneten Fahrzeugzustandes und der in Fig. 6 gezeigten strukturellen Modifikation des Navigationsalgorithmus auf die Fehlerschätzgleichungen des Positionsfilters verdeutlicht. Hierbei werden folgende Unterschiede zu den Fehlerschätzgleichungen gemäß den Fig. 4 und 5 deutlich. Durch den Stillstand des Fahrzeugs steht ein kontinuierlicher Meßwert des z-Kreises 14 als Filterbeobachtung zur Verfügung, so daß im Stillstand eine kontinuierliche Schätzung der Kreisdreift erfolgen kann. Bei der Verfügbarkeit von Positions- beziehungsweise Azimutmessungen können diese neben einer Verbesserung der zugehörigen Schätzgrößen durch Mittelung auch eine Verbesserung der restlichen Schätzgrößen zur Folge haben, da bei einem dem Stillstand vorausgegangenen ungestützten Fahrtabschnitt Kreuzkorrelationen zwischen den einzelnen Fehlerzuständen aufgebaut werden können.

Darüber hinaus kann durch eine Beibehaltung der Überwachung der Positions- und Azimutstützung, wie dies bei der Signalverarbeitung in dem durch Fahrt gekennzeichneten Fahrzeugzustand erfolgte, sichergestellt werden, daß das Positionsfiler nicht außerhalb des zulässigen linearen Arbeitsbereiches betrieben wird. Im Unterschied zum Betriebszustand der Fahrt besteht jedoch im Betriebszustand des Stillstandes keine Notwendigkeit, den Driftzustand und die zugehörige Korrelation in die Rücksetzung des Positionsfilters auf den Default-Status miteinzubeziehen.

Insgesamt wird es also möglich, indem die von dem z-Kreis 14 gelieferten Signale bei Stillstand des Fahrzeugs als direkte Beobachtung dem Kalman-Filter 24 aufgeschaltet werden, eine kontinuierliche Schätzung der Kreisdreift im Stillstand durchzuführen. Gleichzeitig wird durch den Erhalt der Struktur des Positionsfilters, wie in Fig. 7 gezeigt, sichergestellt, daß eine Positions- und/oder Azimutstützung Korrekturen für alle Fehlerzustände zur Folge haben können, wenn entsprechende Kreuzkorrelationen, zum Beispiel in einem vorhergehenden ungestützten Fahrtabschnitt, aufgebaut worden sind.

Durch Beibehaltung der Positions- und Azimutüberwachung auch während des Stillstandszustandes wird eine Dekalibration des Positionsfilters vermieden. Hierbei ist für die Definition des bereits erläuterten Default-Status des Positionsfilters zu beachten, daß eine Dekalibration der Driftschätzung nicht möglich ist und deshalb der Driftzustand mit zugehöriger Kovarianz aus der Rücksetzung auf den Default-Status im Stillstand auszunehmen ist.

Patentansprüche

1. Navigationssystem für ein Fahrzeug, insbesondere für ein Landfahrzeug, mit wenigstens einem einachsigen Kreis 14 für die Fahrzeughochachse (z-Achse), mit zwei Beschleunigungsmessern in der horizontalen Fahrzeugebene (x-Achse, y-Achse), einer fahrzeugfesten Geschwindigkeitsmessung mit einer Stützsignaleinrichtung, insbesondere einem Satellitenempfänger und/oder einer Karte, und mit einer Steuerung, die aus den gemessenen und gespeicherten Signalen mit Hilfe eines geeigneten Kalman-Filters die berechnete Fahrzeugposition und/oder die Fahrtrichtung korrigiert, dadurch gekennzeichnet, daß dem Kalman-Filter (24) wenigstens ein Teilfilter zugeordnet ist, von denen ein erstes Teilfilter einer dynamischen Horizontierung dient und/oder ein zweites Teilfilter als Positionsfiler ausgebildet ist, das eine Kurs-, Positions- und Sensorkalibration bewirkt.

2. Navigationssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Teilfilter der dynamischen Horizontierung eine Drehratenschätzung in der fahrzeugfesten Horizontalebene durchführt und diese quasikontinuierlich in das Navigationssystem (10) zurückgeführt werden.

3. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schätzwerte in einer der jeweiligen Anwendung angepaßten geeigneten Bandbreite zurückgeführt werden.

4. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Rück-

führung von den Drehratenschätzwerten äquivalenter Schätzwerte erfolgt.

5. Navigationssystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß Schätzwerte der diskreten Winkelinkremente in den horizontalen Fahrzeugachsen (x-Achse, y-Achse) rückgeführt werden.

6. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Ordnung des Teilfilters an eine Definition der Fehlerzustände anpaßbar ist.

7. Navigationssystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Teilfilter der dynamischen Horizontierung auf einem diskreten Fehlermodell 6. Ordnung mit folgender Formulierung beruht

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \delta c_{21} \\ \delta \theta_r \\ \delta v_r \\ \delta c_{22} \\ \delta \theta_s \\ \delta v_s \end{bmatrix}_K &= \begin{bmatrix} 1 & -c_{21} & 0 & \Delta \theta_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g\Delta T & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta \theta_s & 0 & 0 & 1 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g\Delta T & 0 & 1 \end{bmatrix}_{K-1} \cdot \begin{bmatrix} \delta c_{21} \\ \delta \theta_r \\ \delta v_r \\ \delta c_{22} \\ \delta \theta_s \\ \delta v_s \end{bmatrix}_{K-1} + \underline{w}_{K-1} \\
 \underline{\delta x_K} &= \underline{\Phi_{K-1}} \cdot \underline{\delta x_{K-1}} + \underline{w}_{K-1} \\
 \begin{bmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \end{bmatrix}_K &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{\delta x_K} + \underline{v_K}
 \end{aligned}$$

8. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Teilfilter der dynamischen Horizontierung als zwei stationäre Kalmanfilter 3. Ordnung dimensioniert ist, und Kopplungen zwischen den Teilfiltern 3. Ordnung bei der Realisierung als deterministische Eingangssignale berücksichtigt werden.

9. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Teilfilter der dynamischen Horizontierung in den Kalman-Filter integriert ist.

10. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine adaptive Dimensionierung des stochastischen Modells des Kalman-Filters, insbesondere eine frequenzbandselektive Bewertung der translatorischen Störungen in den Beschleunigungsmessungen, erfolgt.

11. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem als Positionsfilter ausgebildeten zweiten Teilfilter verwendete Stützpositionen auf ihre Plausibilität überprüft werden und bei nicht plausiblen Stützpositionen eine Rücksetzung des Positionsfilters in einen definierten Status (Default-Status) mit gespeicherten, auf ihre Richtigkeit überprüfte Sensorkalibrationswerte erfolgt.

12. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als überprüfte Sensorkalibrationswerte die Werte der letzten Kontrollnavigation verwendet werden, die nicht zu einer Rücksetzung des Positionsfilters geführt haben.

13. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß beim erstmaligen Einschalten des Positionsfilters dieser in den Default-Status versetzt wird.

14. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zu der Plausibilitätsprüfung der Stützpositionen eine Azimutüberwachung erfolgt.

15. Navigationssystem nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß neben der gestützten Navigationsrechnung eine ungestützte Kontrollnavigation berechnet wird, die an jedem Kontrollpunkt mit der gestützten Navigationsrechnung abgeglichen wird.

16. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die Plausibilitätsüberprüfung und die Azimutüberwachung statistische Fehlerbewertungsverfahren verwendet werden, die als Selbstdiagnose die im Kalman-Filter (24) berechnete Kovarianzinformationen in den Filterschätzgrößen benutzen.

17. Navigationssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei über einen Algorithmus erkannten Stillstand des Fahrzeugs eine Umschaltung des Positionsfilters erfolgt, wobei ein jetzt kontinuierlicher Meßwert eines z-Kreisels als Beobachtung auf den Kalman-Filter (24) geschaltet wird.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

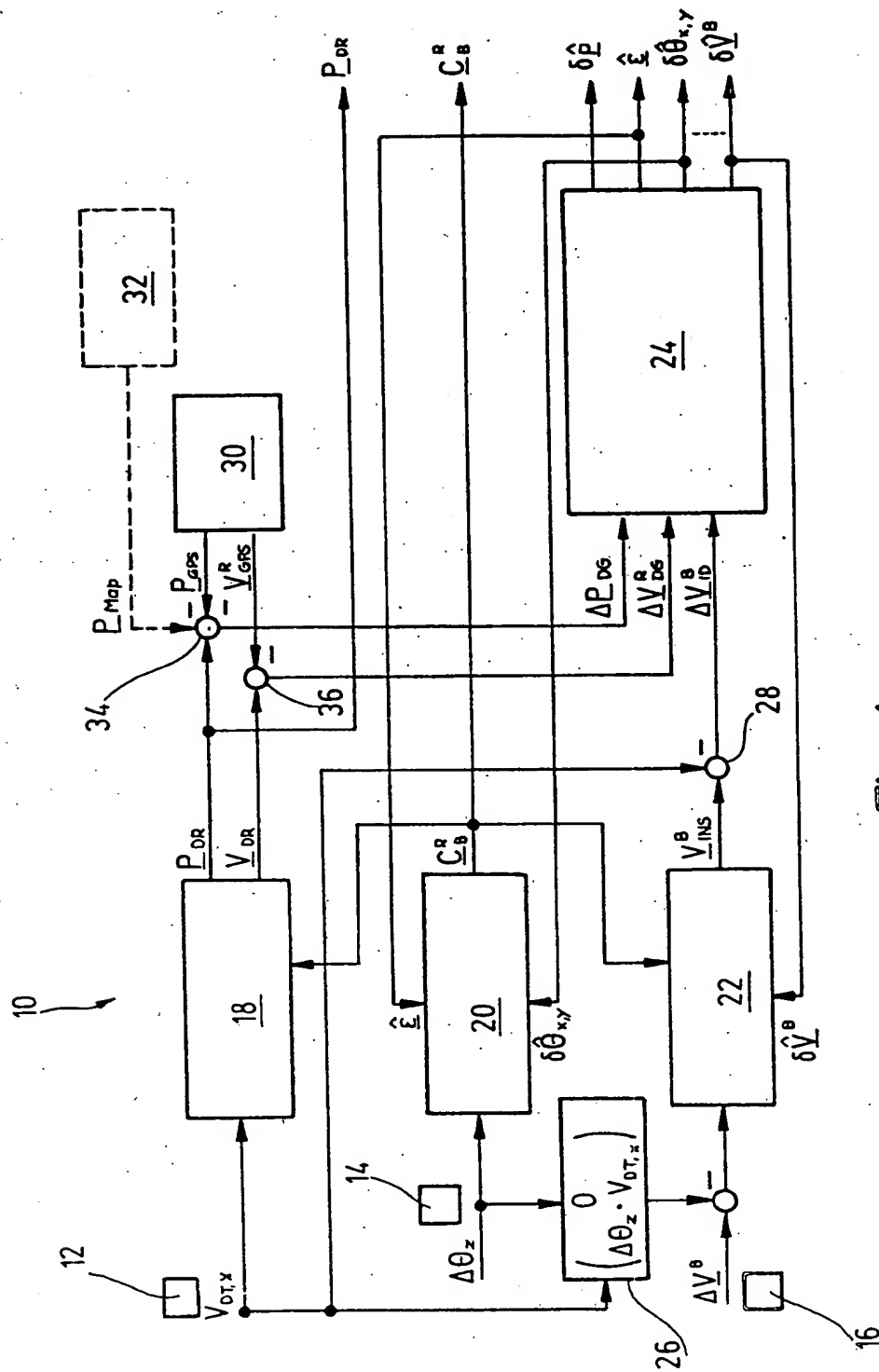


Fig. 1

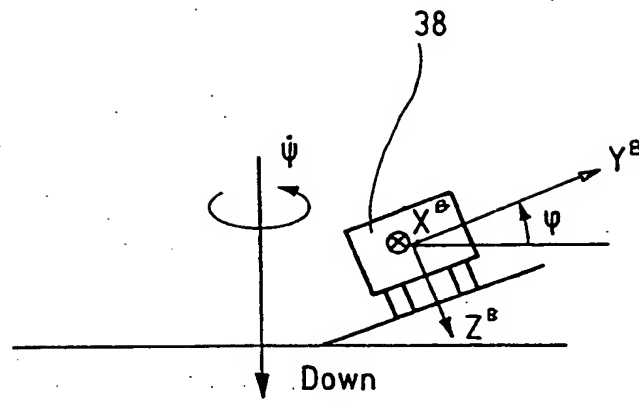


Fig. 2

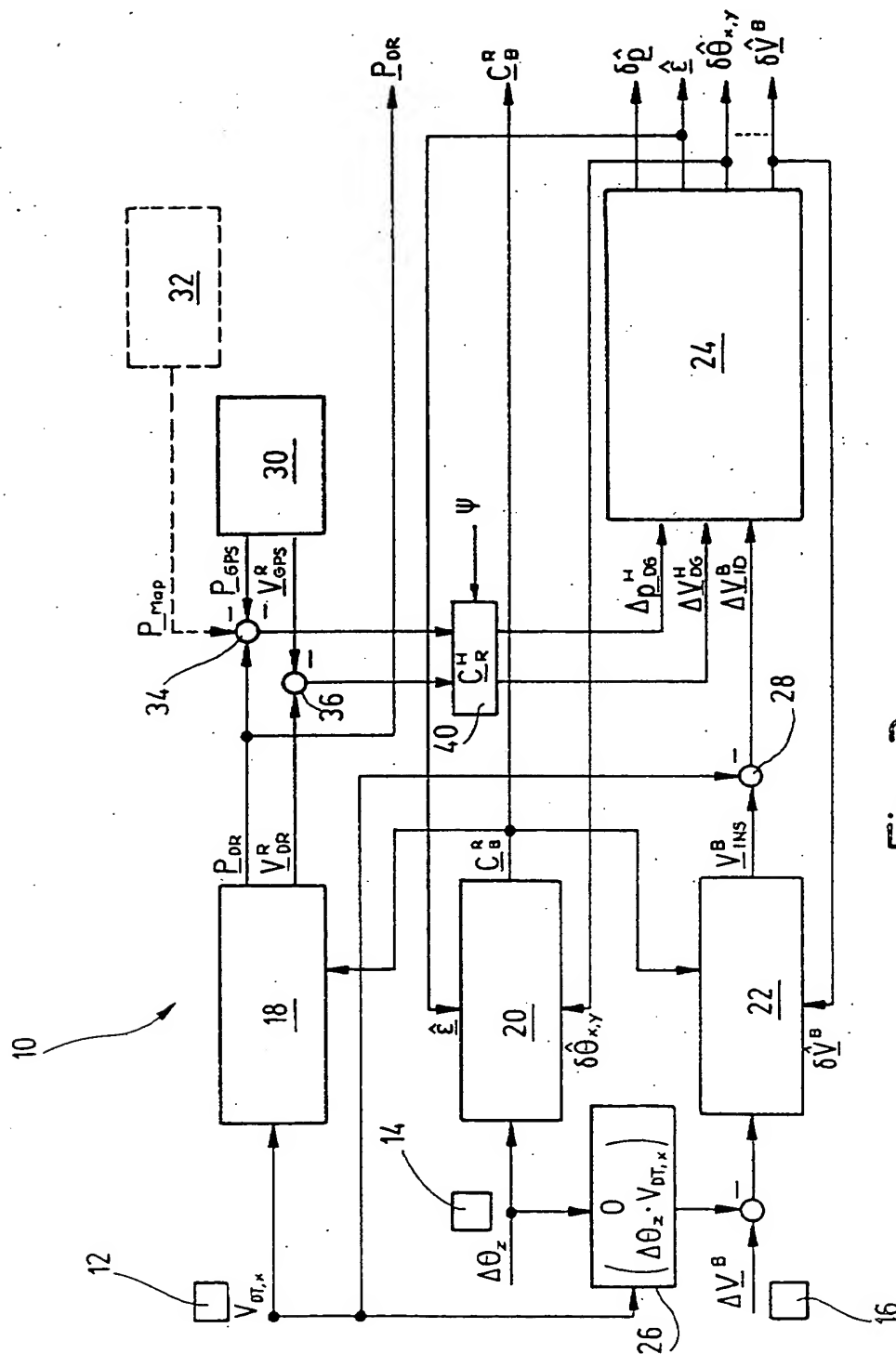


Fig. 3

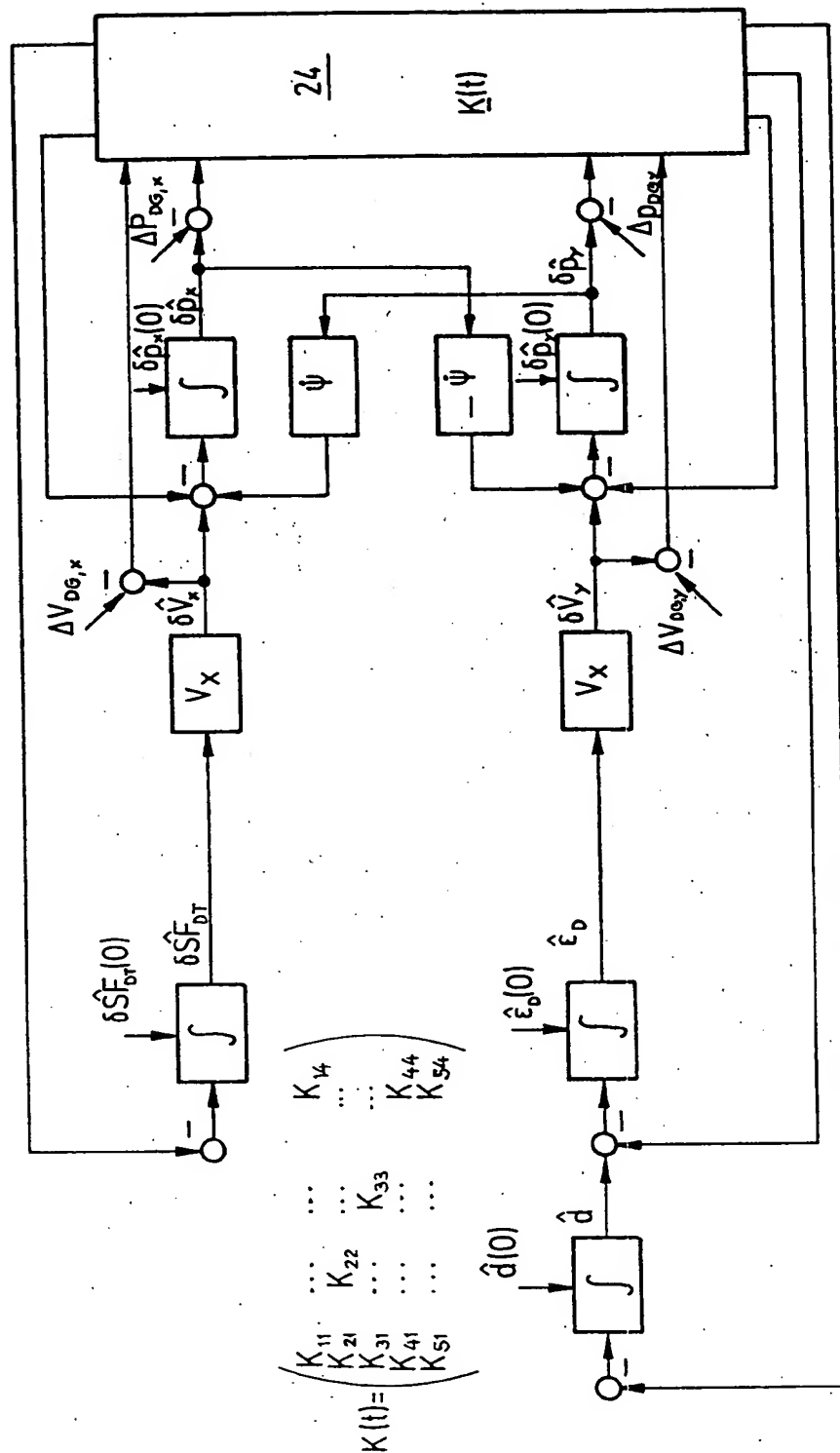


Fig. 4

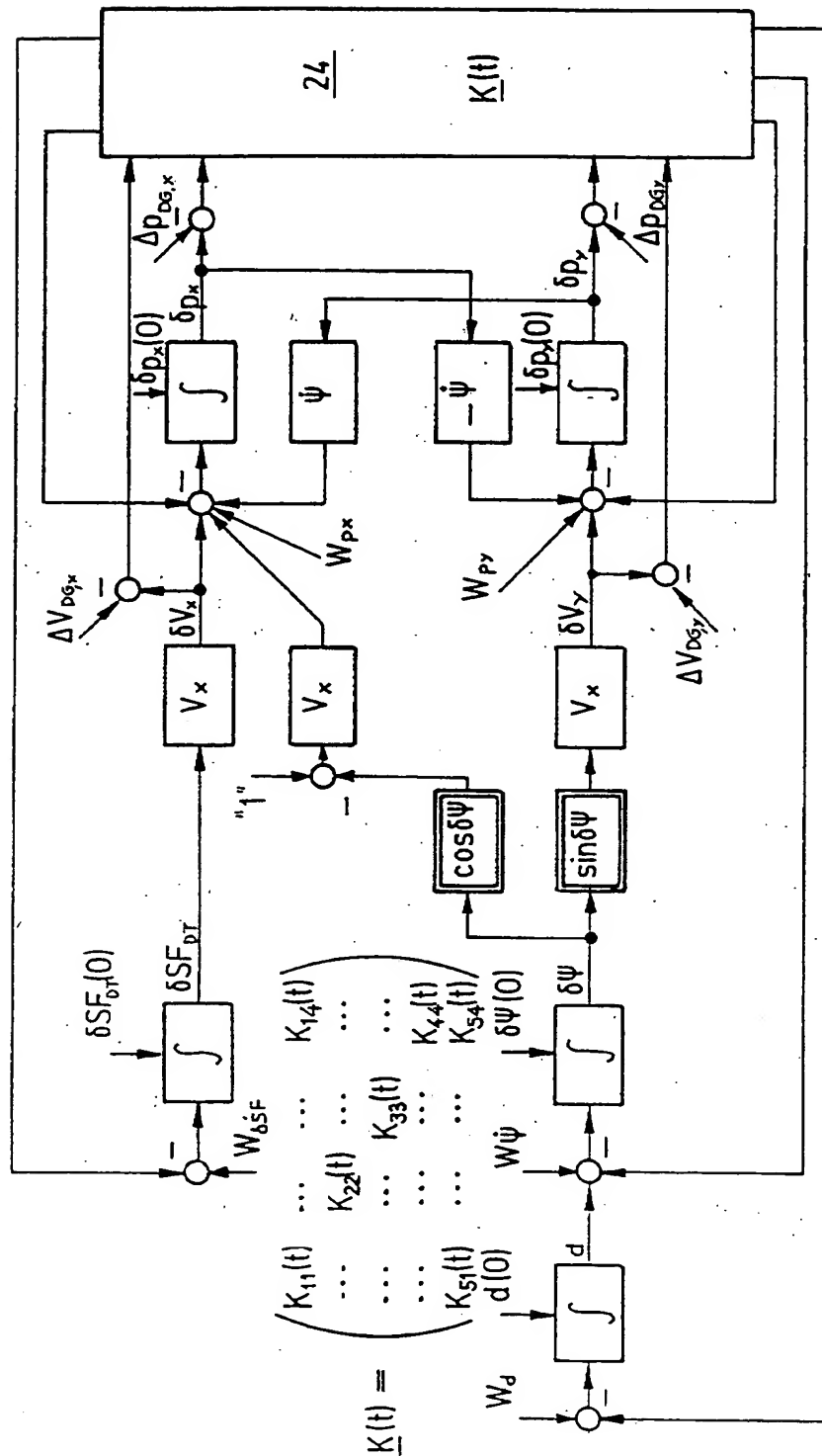


Fig. 5

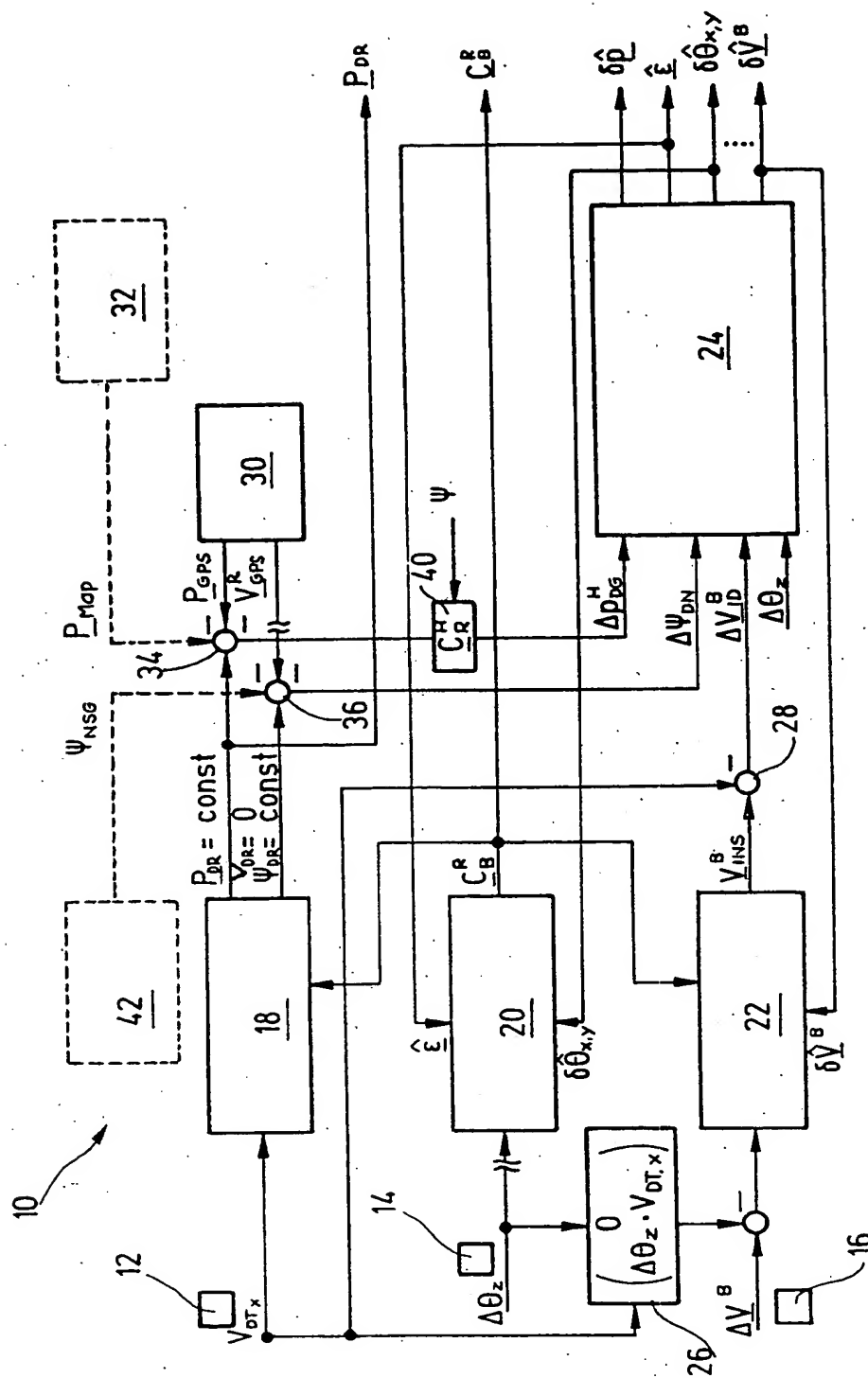


Fig. 6

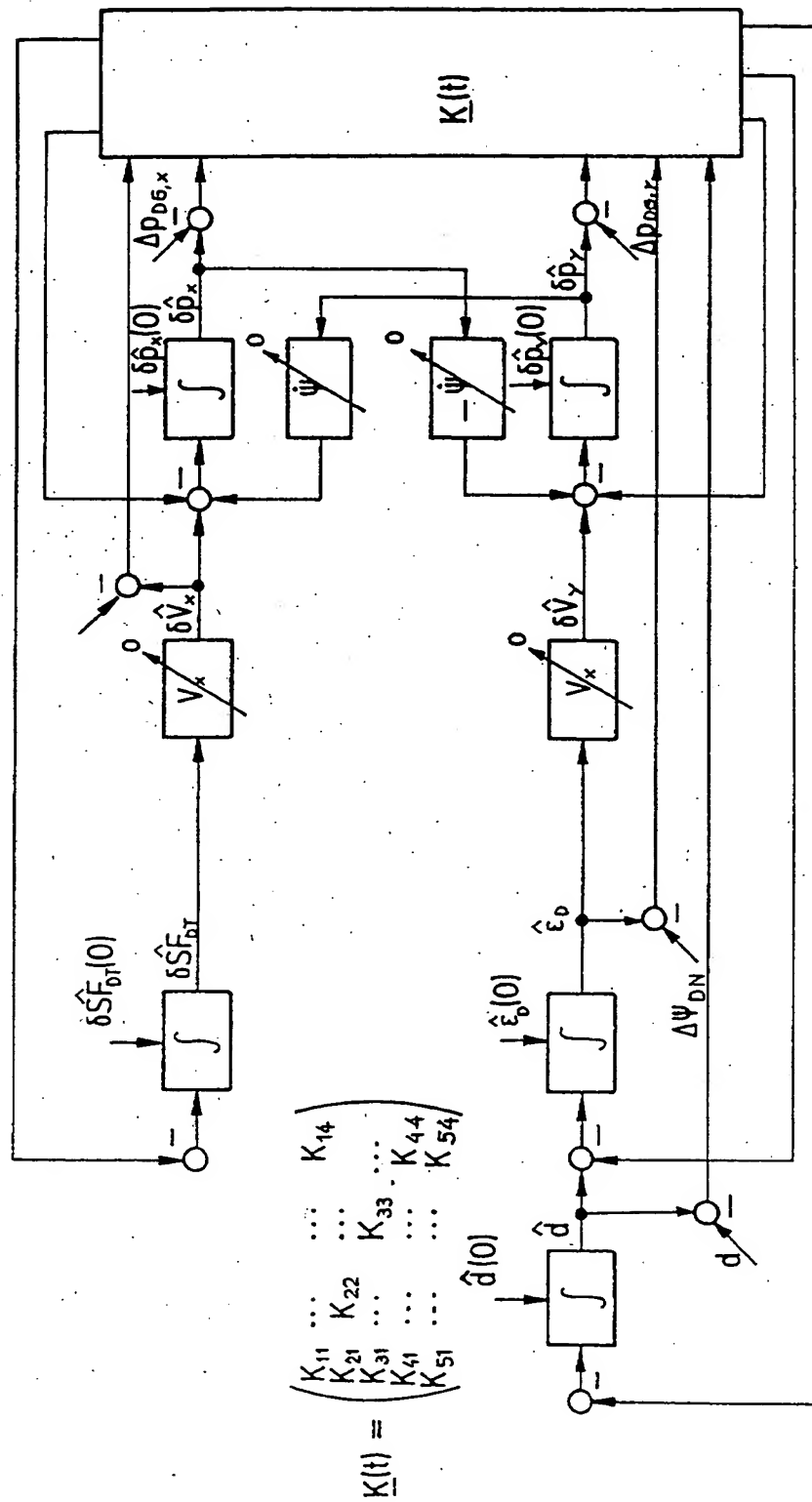


Fig. 7